基于速度调节的无人帆船机器人自适应航向保持控制

张国庆[1,2†], 李纪强[1], 王文新[1], 张卫东[1,2]

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026; 2. 上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘要: 为了解决实际海洋环境下, 无人帆船机器人(USR)航向保持控制任务中存在的模型结构未知、参数不确定和航行速度难以控制等问题, 本文提出一种具有速度调节性能的鲁棒自适应航向保持控制算法. 该算法采用径向基(RBF)神经网络对系统结构不确定进行逼近, 由于引入鲁棒神经阻尼技术和动态面控制技术, 使得闭环控制系统仅需要两个自适应参数对执行器的增益不确定部分进行在线补偿, 并且不需要对神经网络权重参数进行学习更新. 所提出的控制算法能够有效控制无人帆船以期望的航行速度达到设定航向. 利用Lyapunov稳定性理论证明了所提出控制器能够保证闭环控制系统中相关误差变量满足半全局一致最终有界(SGUUB)收敛. 通过在模拟海洋环境干扰下进行计算机仿真研究, 验证了所提出算法具有良好的速度调节性能和鲁棒性.

关键词: 无人帆船; 速度调节; RBF神经网络; 增益不确定; 自适应控制

引用格式: 张国庆, 李纪强, 王文新, 等. 基于速度调节的无人帆船机器人自适应航向保持控制. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2383 – 2390

DOI: 10.7641/CTA.2020.90700

Adaptive course-keeping control for unmaned sailboat robot with the speed regulating mechanism

ZHANG Guo-qing[1,2†], LI Ji-qiang[1], WANG Wen-xin[1], ZHANG Wei-dong[1,2]

(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;
2. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper deals with the course-keeping control problem for the unmanned sailboat robot (USR), aiming to the unknown model structure, parameters uncertainty and speed control difficulty in the practical marine environment. For this purpose, a novel robust adaptive course keeping control algorithm with speed regulating is developed. In this algorithm, the radial basic function (RBF) neural network is employed to approximate the structure's uncertainty. Due to the merits of the robust neural damping technique and the dynamic surface control, only two adaptive parameters are designed to compensate the actuators' gain uncertainty. In addition, the information of the neural networks weights parameters is not needed. The USR could converge to the objective course with the desired navigational speed under the proposed controller. Sufficient effort has been made to guarantee that the corresponding error variables satisfies the semi-global uniform ultimate bounded (SGUUB) stability via the Lyapunov theory. Through the computer simulation under the presence of marine environment, the proposed approach could obtain the better performance in aspects of the speed regulating and robustness.

Key words: unmanned sailboat; speed regulating; radial basic function neural networks; gain uncertainty; adaptive control

Citation: ZHANG Guoqing, LI Jiqiang, WANG Wenxin, et al. Adaptive course-keeping control for unmaned sailboat robot with the speed regulating mechanism. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(11): 2383 – 2390

1 引言

与传统欠驱动水面船舶相比, 无人帆船由于依靠风能提供动力, 能够实现大范围的长期值守任务, 因此在海洋探索、开发和监测方面具有重要应用[1]. 但是由于海洋环境的复杂性, 使得无人帆船帆舵联合系统操纵困难, 进而导致无人帆船航行速度难以有效控

收稿日期: 2019−08−22; 录用日期: 2020−06−05.

†通信作者. E-mail: zgq_dlmu@163.com; Tel.: +86 18940816403.

本文责任编委: 徐胜元.

国家自然科学基金项目(51909018), 辽宁省自然科学基金机器人联合基金项目(20170520189, 20180520039), 大连市科技创新基金项目(2019J12-GX026), 中央高校基本科研业务费专项资金(3132020124)资助.

Supported by the National Science Foundation of China (51909018), the Natural Science Foundation of Liaoning Province (20170520189, 20180520039), the Science and Technology Innovation Fundation of Dalian City (2019J12GX026) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132020124).

制. 过高的航行速度极易导致无人帆船控制系统的不稳定、船体横倾角过大甚至导致帆船倾覆. 为了进一步提高无人帆船机器人自主航行任务中的安全性, 本文旨在研究一种考虑速度调节性能的船舶航向保持控制方法, 对其在海洋工程领域中的应用具有实际意义.

近年来, 无人帆船航向保持/调节控制已成为船舶控制领域一个热点研究主题[2], 许多学者已开展初步探索并取得系列有益结果. 文献[3]阐述了帆角和风向之间的逻辑关系, 并且提出了一种模糊逻辑控制算法, 实现了无人帆船沿着期望航向自动航行任务. 但是无人帆船属于一类具有较强的模型不确定和干扰的时变系统, 时变的海洋环境极易导致控制系统不稳定. 文献[4]考虑了帆船空气动力和水动力特性, 在3自由度帆船模型基础上, 提出了一种能够使帆产生最大推力的航向保持控制算法, 该算法在风力较小时能够获得最大航行速度, 具有较好的控制效果. 但是由于帆属于帆船的固有结构, 在受到风力作用下, 横摇运动对无人帆船机器人的航向控制系统具有重要的影响. 因此文献[5–6]在已有工作的基础上提出了一种4自由度(4 degree of freedom, 4–DOF)非线性帆船模型. 林晓将舵角和帆角作为控制输入, 在不考虑外界海洋环境干扰的前提下采用Backstepping方法设计了一种航向保持控制律, 并且证明了闭环控制系统具有全局一致渐进稳定性[7]. 为了获得最大的航行速度, 提高帆船的运营效率, 文献[8]提出一种基于人工势场法的控制器, 帆角通过速度极图进行查找, 能够产生时变的最大推力.

在上述文献中, 主要存在两类问题: 第1类问题是无人帆船机器人的航行速度控制问题. 实际上, 在现有理论文献中, 部分研究者致力于通过优化帆角来获得最大的帆船航行速度[9–10]. 文献[11]提出了一种通过极值查找的在线速度优化算法, 并且通过12 m长的龙骨帆船进行数值仿真验证. 由于外界海洋环境的时变性, 无人帆船机器人航行速度存在一定抖振现象. Matteo Corno设计了一种改进的速度优化器和航向保持器[12], 分别作用于帆和舵, 通过实船试验, 验证了控制算法的有效性. 在实际海洋工程中, 尽管最大的帆船航速在某些方面是有利的, 特别是在帆船竞技中, 但是过高的航行速度可能会导致航向保持控制系统的不稳定或无效, 甚至会导致帆船倾覆. 因此采用适合的航行速度对帆船航向保持控制系统来说是十分有必要的. 第2类问题是在实际控制工程中致动器的增益函数未知属于一类普遍的工程限制问题. 但是在上述文献中, 均假设致动器的增益函数已知, 这与实际海洋工程存在一定差异, 并且可能会降低相关理论算法的有效性和控制精度. 在作者先前的工作中[13–14], 利用鲁棒神经阻尼技术对欠驱动水面船舶致动器的增益函数设计自适应参数, 很好的缓解了增益函数未知带来的系统误差.

基于以上分析, 本文在考虑实际海洋环境的情况下对无人帆船机器人进行一种基于速度调节的鲁棒自适应控制器设计. 在控制器设计中, 采用RBF神经网络对系统模型不确定部分进行逼近, 并通过鲁棒神经阻尼技术构建阻尼项以镇定系统动态中不确定部分的影响. 使得闭环控制系统仅需两个自适应参数对伺服机构的增益不确定部分进行在线补偿, 而不需要在线更新神经网络权重值. 所设计的鲁棒自适应控制算法具有形式简捷、计算负载小和速度性能可控的优势, 这能够提高在实际海洋工程中的应用性, 最后通过理论分析和仿真对比实验验证了闭环控制系统的有效性和鲁棒性.

2 基础知识

2.1 USR的非线性数学模型

林晓将帆船分为帆、舵、龙骨和船体4部分, 并在物理推理的基础上建立了未考虑外界海洋环境干扰的四自由度非线性数学模型[7], 在实际海洋工程中, 存在外界海洋环境扰动且很难消除. 对于无人帆船来说, 由于帆结构的存在, 使得无人帆船更容易受到外界海洋环境扰动的影响. 本文考虑外界海洋环境干扰并通过模型转化, 无人帆船的数学模型在水平面上可以表示为式(1)和式(2):

$$\begin{cases} \dot{x} = u\cos\psi - v\cos\phi\sin\psi, \\ \dot{y} = u\sin\psi + v\cos\phi\cos\psi, \\ \dot{\phi} = p, \\ \dot{\psi} = r\cos\phi, \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \dot{u} = \dfrac{1}{m_{\mathrm{u}}}(F_{\mathrm{Su}} + F_{\mathrm{Ru}} + F_{\mathrm{Ku}} + \\ \quad m_{\mathrm{v}}vr - F_{\mathrm{Du}}) + d_{\mathrm{wu}}, \\ \dot{v} = \dfrac{1}{m_{\mathrm{v}}}(F_{\mathrm{Sv}} + F_{\mathrm{Rv}} + F_{\mathrm{Kv}} + \\ \quad m_{\mathrm{u}}ur - F_{\mathrm{Dv}}) + d_{\mathrm{wv}}, \\ \dot{p} = \dfrac{1}{m_{\mathrm{p}}}(M_{\mathrm{Sp}} + M_{\mathrm{Rp}} + M_{\mathrm{Kp}} - \\ \quad g(\phi) - M_{\mathrm{Dp}}) + d_{\mathrm{wp}}, \\ \dot{r} = \dfrac{1}{m_{\mathrm{r}}}(M_{\mathrm{Sr}} + M_{\mathrm{Rr}} + M_{\mathrm{Kr}} - \\ \quad (X_{\dot{\mathrm{u}}} - Y_{\dot{\mathrm{v}}})uv - M_{\mathrm{Dr}}) + d_{\mathrm{wr}} \end{cases} \tag{2}$$

且有

$$g(\phi) = mgGM_{\mathrm{t}}\sin\phi\cos\phi,$$

式中: $m_{\mathrm{u}} = m - X_{\dot{\mathrm{u}}}$, $m_{\mathrm{v}} = m - Y_{\dot{\mathrm{v}}}$, $m_{\mathrm{p}} = I_{\mathrm{x}} - K_{\dot{\mathrm{p}}}$, $m_{\mathrm{r}} = I_{\mathrm{z}} - N_{\dot{\mathrm{r}}}$, m表示帆船的质量, $X_{\dot{\mathrm{u}}}$, $Y_{\dot{\mathrm{v}}}$, $K_{\dot{\mathrm{p}}}$, $N_{\dot{\mathrm{r}}}$表示帆船的水动力导数; GM_{t}表示横稳心高度值; $\boldsymbol{\eta} = [x\ \ y\ \ \phi\ \ \psi]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3$(如图1) 表示在惯性坐标系下帆船

的位置姿态、横摇角和艏摇角; $\boldsymbol{v}=[u\ \ v\ \ p\ \ r]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^3$表示在附体坐标系下帆船的前进速度、横漂速度、横摇速度和艏摇速度; $d_{\mathrm{w}i}(i=u,v,p,r)$分别为外界海洋环境扰动力/力矩; $[F_{ij}\ \ M_{ij}]^{\mathrm{T}}(i=\mathrm{S},\mathrm{R},\mathrm{K},\mathrm{D},\ j=u,v,p,r)$表示帆、舵、龙骨和船体产生的力/力矩.

对于无人帆船机器人系统来说, 控制输入变量为帆角和舵角, 即帆产生的前向推力F_{Su}和舵产生的转船力矩M_{Rr}, 为了下一步的控制器设计, F_{Su}和M_{Rr}可以表示为

$$F_{\mathrm{Su}}=\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{a}}A_{\mathrm{S}}U_{\mathrm{aw}}^2C_{S_{\mathrm{L}}}(\alpha_{\mathrm{S}})\sin\,\beta_{\mathrm{ws}},\tag{3}$$

$$M_{\mathrm{Rr}}=\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{w}}A_{\mathrm{R}}U_{\mathrm{ar}}^2C_{R_{\mathrm{L}}}(\alpha_{\mathrm{R}})|x_{\mathrm{r}}|,\tag{4}$$

式中: ρ_{a}和ρ_{w}分别表示空气和水的密度; U_{aw}和U_{ar}表示作用于帆和舵的相对风速和相对流速; A_{S}和A_{R}分别表示帆面积和舵面积; β_{ws}表示视风角; $|x_{\mathrm{r}}|$表示舵质心在附体坐标系下的x坐标; α_{S}和α_{R}表示帆的攻角和舵的攻角$C_{S_{\mathrm{L}}}(\alpha_{\mathrm{S}})$和$C_{R_{\mathrm{L}}}(\alpha_{\mathrm{R}})$分别为帆和舵的升力系数, 而且$\alpha_{\mathrm{s}}$和$\alpha_{\mathrm{R}}$与控制输入$\delta_{\mathrm{s}}$和$\delta_{\mathrm{r}}$的关系为

$$\begin{aligned}\alpha_{\mathrm{S}}&=\beta_{\mathrm{ws}}-\delta_{\mathrm{s}},\\ \alpha_{\mathrm{R}}&=\beta_{\mathrm{wr}}-\delta_{\mathrm{r}},\end{aligned}\tag{5}$$

β_{wr}表示视流角.

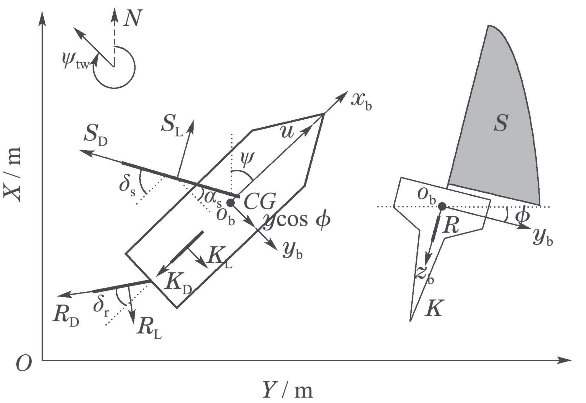


图 1 USR四自由度运动变量描述

Fig. 1 Description of 4–DOF kinetic variables for USR

考虑到实际海洋工程需求, 作如下假设:

假设 1　无人帆船机器人横漂运动耗散有界稳定, 也就是横漂速度存在上界.

假设 2　对于外界海洋环境随机扰动$\boldsymbol{d}_{\mathbf{w}}=[d_{\mathrm{wu}}\ \ d_{\mathrm{wv}}\ \ d_{\mathrm{wp}}\ \ d_{\mathrm{wr}}]^{\mathrm{T}}$, 存在未知常量$\bar{\boldsymbol{d}}_{\mathrm{w}}=[\bar{d}_{\mathrm{wu}}\ \ \bar{d}_{\mathrm{wv}}\ \ \bar{d}_{\mathrm{wp}}\ \ \bar{d}_{\mathrm{wr}}]^{\mathrm{T}}$满足$\boldsymbol{d}_{\mathrm{w}}\leqslant\bar{\boldsymbol{d}}_{\mathrm{w}}$.

假设 3　假设无人帆船机器人为一刚体并且忽略纵摇和垂荡运动, 忽略海流对舵的影响, 即水流对舵的攻角等于$-\delta_{\mathrm{r}}$.

本文的控制目标在于针对无人帆船机器人系统设计一种具有速度调节性能的鲁棒自适应航向保持控制算法, 该算法能够保证无人帆船系统以期望的航行速度收敛到目标航向.

2.2　RBF神经网络

在控制工程中, RBF神经网络作为一种典型的非线性函数逼近器[15], 能有效重构任意非线性函数, 并且RBF神经网络船舶路径跟踪控制[16]及飞行器控制领域[17]具有广泛的工程应用. 本文引入RBF神经网络逼近系统模型不确定(含结构未知和参数不确定), 并利用鲁棒神经阻尼技术构建单一自适应参数补偿其影响, 保证闭环控制系统的鲁棒性能. 为此, 引入以下引理.

引理 1[18]　对于在紧集$\Omega_{\boldsymbol{x}}$中任意给定的连续函数$f(\boldsymbol{x})(f(\boldsymbol{0})=0)$, 可以被RBF神经网络(6)以任意精度进行逼近:

$$f(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{S}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\varepsilon(\boldsymbol{x}),\ \forall\boldsymbol{x}\in\Omega_{\boldsymbol{x}},\tag{6}$$

式中$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{x})=[s_1(\boldsymbol{x})\ \ s_2(\boldsymbol{x})\ \cdots\ s_l(\boldsymbol{x})]$表示高斯函数. 如式(7), $l>1$为神经网络节点数量, μ_i和ξ_i分别表示高斯函数的中心和宽度值:

$$s_i(\boldsymbol{x})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_i}\exp\big(-\frac{(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_i)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_i)}{2\xi_i^2}\big),\tag{7}$$

$\varepsilon(\boldsymbol{x})$表示未知逼近误差, 且有逼近误差上界$\bar{\varepsilon}$, n为$\boldsymbol{x}$的维数, $\boldsymbol{A}$表示权重向量, 可以表示为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\omega_{11}&\omega_{12}&\cdots&\omega_{1n}\\ \omega_{21}&\omega_{22}&\cdots&\omega_{2n}\\ \vdots&\vdots&&\vdots\\ \omega_{l1}&\omega_{l2}&\cdots&\omega_{ln}\end{bmatrix}.\tag{8}$$

3　鲁棒自适应控制器设计

将帆角和舵角作为控制输入, 结合鲁棒神经阻尼技术和动态面技术, 设计具有速度调节性能的鲁棒自适应航向保持控制算法, 由于无人帆船数学模型(1)和(2)存在模型不确定以及未知项, 为了方便控制器设计, 忽略横漂运动和横摇运动, 仅考虑无人帆船的艏摇运动和前进运动, 无人帆船前向推进力主要由帆在u方向上产生的分力F_{Su}提供, 转船力矩M_{Rr}主要由舵提供. 因此将帆、舵、龙骨、船体产生的其他力/力矩$(F_{i\mathrm{u}},M_{j\mathrm{r}},i=\mathrm{R},\mathrm{K},\mathrm{D},j=\mathrm{S},\mathrm{K},\mathrm{D})$作为模型摄动和不确定部分, 用非线性函数$f_{\mathrm{r}}(\cdot)$, $f_{\mathrm{u}}(\cdot)$ 代替, 由此无人帆船非线性数学模型式(1)和式(2)可以被简化为

$$\begin{cases}\dot{\psi}=r\cos\phi,\\ \dot{r}=\dfrac{m_{\mathrm{u}}-m_{\mathrm{v}}}{m_{\mathrm{r}}}uv-\dfrac{f_{\mathrm{r}}(\cdot)}{m_{\mathrm{r}}}+\dfrac{g_{\mathrm{r}}(\cdot)}{m_{\mathrm{r}}}u_{\delta_{\mathrm{r}}}(\cdot)+d_{\mathrm{wr}},\\ \dot{u}=\dfrac{m_{\mathrm{v}}}{m_{\mathrm{u}}}vr-\dfrac{f_{\mathrm{u}}(\cdot)}{m_{\mathrm{u}}}+\dfrac{g_{u}(\cdot)}{m_{\mathrm{u}}}u_{\delta_{\mathrm{s}}}(\cdot)+d_{\mathrm{wu}},\end{cases}\tag{9}$$

且

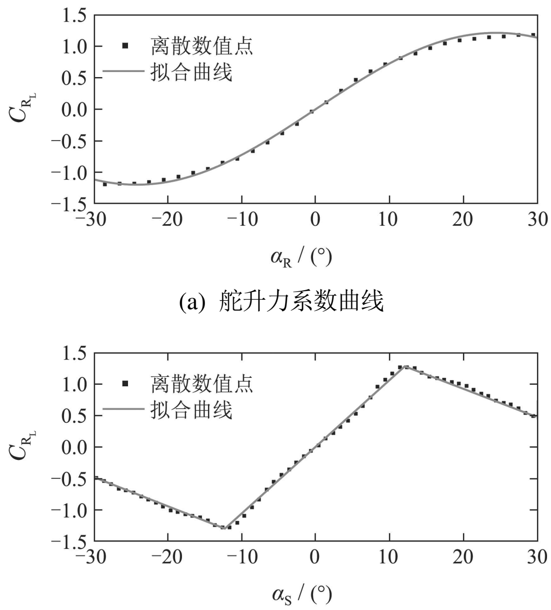
$$\begin{cases} u_{\delta_{\rm r}}(\cdot) = C_{\rm R_L}(\alpha_{\rm R}), \\ u_{\delta_{\rm s}}(\cdot) = C_{\rm S_L}(\alpha_{\rm S}), \\ g_{\rm r}(\cdot) = -\dfrac{1}{2}\rho_{\rm w} A_{\rm R} U_{\rm ar}^2 |x_{\rm r}|, \\ g_{\rm u}(\cdot) = \dfrac{1}{2}\rho_{\rm a} A_{\rm S} U_{\rm aw}^2 \sin\beta_{\rm ws}, \end{cases} \tag{10}$$

$g_{\rm r}(\cdot)$, $g_{\rm u}(\cdot)$表示帆、舵执行器增益[19], 在实际船舶控制工程中, $g_{\rm r}(\cdot)$, $g_{\rm u}(\cdot)$存在未知上界$\bar{g}_{\rm r}(\cdot)$, $\bar{g}_{\rm u}(\cdot)$.

式(10)中$C_{\rm R_L}(\alpha_{\rm R})$和$C_{\rm S_L}(\alpha_{\rm S})$分别为舵和帆升力系数. 在船舶资料中, $C_{\rm R_L}(\alpha_{\rm R})$和$C_{\rm S_L}(\alpha_{\rm S})$以离散数值点的形式给出, 如图2所示. 在进行控制器设计时需要进行数值内插来获得相应的舵攻角和帆攻角, 为了简化控制器设计过程, 本文采用一个正弦函数和多项式函数对$C_{\rm R_L}(\alpha_{\rm R})$和$C_{\rm S_L}(\alpha_{\rm S})$进行拟合, 结合假设3, 拟合函数为式(11), 拟合效果如图2所示.

$$\begin{aligned} &C_{\rm R_L}(\alpha_{\rm R}) = \epsilon_1 \sin(\epsilon_2 \delta_{\rm r}), \\ &C_{\rm S_L}(\alpha_{\rm S}) = a_i(\beta_{\rm ws} - \delta_{\rm s}) + b_i,\ i = 1, 2, 3, \end{aligned} \tag{11}$$

式中: $\delta_{\rm r}$表示输入舵角, $\epsilon_1, \epsilon_2, a_i, b_i$为拟合系数.



(a) 舵升力系数曲线

(b) 帆升力系数曲线

图 2 拟合曲线

Fig. 2 Fitted curve

下面将结合鲁棒神经阻尼和动态面技术, 对鲁棒自适应控制器进行设计.

步骤 1 定义艏向误差变量$\psi_{\rm e} = \psi - \psi_{\rm d}$, 且有

$$\dot{\psi}_{\rm e} = r\cos\phi - \dot{\psi}_{\rm d}. \tag{12}$$

为了正定误差变量$\psi_{\rm e}$, 设计虚拟控制律$\alpha_{\rm r}$:

$$\alpha_{\rm r} = \frac{1}{\cos\phi}(-k_{\rm r}\psi_{\rm e} + \dot{\psi}_{\rm d}), \tag{13}$$

式中$k_{\rm r}$为正的设计参数. 在下一步的控制器设计中, $\dot{\alpha}_{\rm r}$是难以被计算的并且容易引起“计算爆炸”, 因此引入动态面控制技术[20–21], 使$\alpha_{\rm r}$以一定的时间常数$\tau_{\rm u}$通过一阶滤波器$\beta_{\rm r}$, 即

$$\tau_{\rm r}\dot{\beta}_{\rm r} + \beta_{\rm r} = \alpha_{\rm r},\ \beta_{\rm r}(0) = \alpha_{\rm r}(0),\ q_{\rm r} = \beta_{\rm r} - \alpha_{\rm r}, \tag{14}$$

$q_{\rm r}$表示动态面误差, 并且

$$\begin{aligned} &\dot{q}_{\rm r} = \dot{\beta}_{\rm r} - \dot{\alpha}_{\rm r} = \\ &-\frac{q_{\rm r}}{\tau_{\rm r}} + \frac{\partial\alpha_{\rm r}}{\partial\psi}\dot{\psi} + \frac{\partial\alpha_{\rm r}}{\partial\psi_{\rm d}}\dot{\psi}_{\rm d} + \frac{\partial\alpha_{\rm r}}{\partial\dot{\psi}_{\rm d}}\ddot{\psi}_{\rm d} + \frac{\partial\alpha_{\rm r}}{\partial\phi}\dot{\phi} = \\ &-\frac{q_{\rm r}}{\tau_{\rm r}} + B_{\rm r}(\cdot), \end{aligned} \tag{15}$$

式中$B_{\rm r}(\cdot)$为一具有上界$M_{\rm r}$的连续函数, 满足$|B_{\rm r}(\cdot)| \leqslant M_{\rm r}$.

步骤 2 定义误差变量$u_{\rm e} = u_{\rm d} - u$, $r_{\rm e} = \alpha_{\rm r} - r$, 并求导得

$$\begin{cases} \dot{u}_{\rm e} = \dfrac{1}{m_{\rm u}}[m_{\rm u}\dot{u}_{\rm d} - m_{\rm v}vr + f_{\rm u}(\cdot) - \\ \qquad g_{\rm u}(\cdot)u_{\delta_{\rm s}}(\cdot) - m_{\rm u}d_{\rm wu}], \\ \dot{r}_{\rm e} = \dfrac{1}{m_{\rm r}}[m_{\rm r}\dot{\beta}_{\rm r} - (m_{\rm u} - m_{\rm v})uv + \\ \qquad f_{\rm r}(\cdot) - g_{\rm r}(\cdot)u_{\delta_{\rm r}}(\cdot) - m_{\rm r}d_{\rm wr}]. \end{cases} \tag{16}$$

式(16)中, 由于期望航速$u_{\rm d}$的变化属于慢时变过程[17], 因此一阶导数$\dot{u}_{\rm d}$存在, 且满足$\dot{u}_{\rm d} \leqslant \bar{\dot{u}}_{\rm d}$. 未知函数$f_{\rm u}(\cdot)$, $f_{\rm r}(\cdot)$可以被RBF神经网络逼近为

$$\begin{cases} f_{\rm u}(u) = \boldsymbol{S}(u)\boldsymbol{A}u + \varepsilon(u) = \\ \qquad \boldsymbol{S}(u)\boldsymbol{A}u_{\rm d} - \boldsymbol{S}(u)\boldsymbol{A}u_{\rm e} + \varepsilon(u) = \\ \qquad \boldsymbol{S}(u)\boldsymbol{A}u_{\rm d} - b_{\rm u}\boldsymbol{S}(u)w_{\rm u} + \varepsilon(u), \\ f_{\rm r}(r) = \boldsymbol{S}(r)\boldsymbol{A}\beta_{\rm r} - b_{\rm r}\boldsymbol{S}(r)w_{\rm r} + \varepsilon(r), \end{cases} \tag{17}$$

式中$\varepsilon(i)(i = u, r)$为逼近误差. 令$b_i = \|\boldsymbol{A}\|_{\rm F}$, $\boldsymbol{A}_i^m = \boldsymbol{A}_i/\|\boldsymbol{A}\|_{\rm F}$, 可以进一步得到$w_i = \boldsymbol{A}_i^{\rm m}i_{\rm e}$, $b_iw_i = \boldsymbol{A}_ii_{\rm e}$. 在此基础上, 构造鲁棒神经阻尼项

$$\begin{cases} \|\nu_{\rm u}\|_2 = \|\boldsymbol{S}(u)\boldsymbol{A}_{\rm u}u_{\rm d} - m_{\rm v}vr + \varepsilon_{\rm u} - m_{\rm u}d_{\rm wu}\|_2 \leqslant \\ \qquad \|\boldsymbol{S}(u)\boldsymbol{A}_{\rm u}u_{\rm d} + d_{\rm u}\xi_{\rm u} + \bar{\varepsilon}_{\rm u} + m_{\rm u}\bar{d}_{\rm wu}\|_2 \leqslant \\ \qquad \theta_{\rm u}\varphi_{\rm u}, \\ \|\nu_{\rm r}\|_2 \leqslant \theta_{\rm r}\varphi_{\rm r}, \end{cases} \tag{18}$$

式中: $\theta_i = \max\{\|\boldsymbol{A}_i\|_{\rm F}, d_i, \bar{\varepsilon}(i) + m_i\bar{d}_{{\rm w}i}\}$, $i = u, r$为未知有界参数, $d_i > 0$为未知常数; $\varphi_{\rm u} = 1 + \xi_{\rm u}(r) + \|\boldsymbol{S}(u)\|\|u_{\rm d}\|$, $\varphi_{\rm r} = 1 + \xi_{\rm r}(r) + \|\boldsymbol{S}(r)\|\|\beta_{\rm r}\|$表示阻尼项, 其中: $\xi_{\rm u} = \dfrac{v^2}{4} + r^2$, $\xi_{\rm r} = \dfrac{u^2}{4} + v^2$.

基于以上分析, 误差动态系统(16)可被重述为

$$\begin{cases} \dot{u}_{\rm e} = \dfrac{1}{m_{\rm u}}[m_{\rm u}\dot{u}_{\rm d} + \nu_{\rm u} - b_{\rm u}\boldsymbol{S}(u)w_{\rm u} - g_{\rm u}(\cdot)u_{\delta_{\rm s}}(\cdot)], \\ \dot{r}_{\rm e} = \dfrac{1}{m_{\rm r}}[m_{\rm r}\dot{\beta}_{\rm r} + \nu_{\rm r} - b_{\rm r}\boldsymbol{S}(r)w_{\rm r} - g_{\rm r}(\cdot)u_{\delta_{\rm r}}(\cdot)]. \end{cases} \tag{19}$$

在鲁棒自适应控制器设计中, 选取两个自适应学习参数$\hat{\lambda}_{g_{\rm u}}$和$\hat{\lambda}_{g_{\rm r}}$, 对系统增益函数的不确定项进行在线补偿. $\hat{\lambda}_{g_{\rm u}}$ 作为 $\lambda_{g_{\rm u}} = \dfrac{1}{g_{\rm u}(\cdot)}$ 的估计值, $\hat{\lambda}_{g_{\rm r}}$ 作为 $\lambda_{g_{\rm r}} = \dfrac{1}{g_{\rm r}(\cdot)}$ 的估计值. 这种设计的主要优势在于能够避开自适应参数的奇异性问题. 结合式(10)–(11)及式(19), 针对控制输入$\delta_{\rm s}$和$\delta_{\rm r}$设计鲁棒自适应控制器, 得到控制律(20)和自适应律(21):

$$\begin{cases}\delta_{\rm s} = \beta_{\rm ws} - \dfrac{1}{a_i}(u_{\delta_{\rm s}}(\cdot) - b_i),\ u_{\delta_{\rm s}} = \hat{\lambda}_{g_{\rm u}}\alpha_{\rm N},\\ \delta_{\rm r} = \dfrac{1}{\epsilon_2}{\rm asin}(\dfrac{1}{\epsilon_1}u_{\delta_{\rm r}}(\cdot)),\ u_{\delta_{\rm r}} = \hat{\lambda}_{g_{\rm r}}\alpha_{\rm M},\\ \alpha_{\rm N} = k_{\rm ue}u_{\rm e} + \dot{u}_{\rm d} + k_{\rm un}\varPsi_{\rm u}(\cdot)u_{\rm e},\\ \alpha_{\rm M} = k_{\rm re}r_{\rm e} + \dot{\beta}_{\rm r} + k_{\rm rn}\varPsi_{\rm r}(\cdot)r_{\rm e} - \psi_{\rm e}\cos\phi,\end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\lambda}}_{g_{\rm u}} &= \varGamma_{g_{\rm u}}[\alpha_{\rm N}u_{\rm e} - \sigma_{\rm u}(\hat{\lambda}_{g_{\rm u}} - \hat{\lambda}_{g_{\rm u}}(0))],\\ \dot{\hat{\lambda}}_{g_{\rm r}} &= \varGamma_{g_{\rm r}}[\alpha_{\rm M}r_{\rm e} - \sigma_{\rm r}(\hat{\lambda}_{g_{\rm r}} - \hat{\lambda}_{g_{\rm r}}(0))],\end{aligned} \tag{21}$$

式中: $\varPsi_{\rm r}(\cdot) = (\varphi_{\rm r}^2 + \boldsymbol{S}^{\rm T}(r)\boldsymbol{S}(r))/4$, $\varPsi_{\rm u}(\cdot) = (\varphi_{\rm u}^2 + \boldsymbol{S}^{\rm T}(u)\boldsymbol{S}(u))/4$; $a_i, b_i, \epsilon_1, \epsilon_2$ 为拟合系数; $k_{\rm ue}, k_{\rm re}, k_{\rm un}, k_{\rm rn}$为控制器参数; $\varGamma_{g_{\rm u}}, \sigma_{\rm u}, \varGamma_{g_{\rm r}}, \sigma_{\rm r}$表示自适应参数.

4　稳定性分析

定理 1　若无人帆船系统(1)–(2)的所有状态变量满足

$$\psi_{\rm e}^2(0)+u_{\rm e}^2(0)+r_{\rm e}^2(0)+q_{\rm r}^2(0)+\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}^{\rm T}(0)\varGamma_{g_{\rm u}}^{-1}\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}(0)+\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}^{\rm T}(0)\varGamma_{g_{\rm r}}^{-1}\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}(0) < 2C_0,$$

其中C_0为一正常数. 在满足假设1–3的前提下, 综合应用虚拟控制律(13)、鲁棒神经控制律(20)和自适应律(21), 可以保证闭环控制系统的所有变量满足半全局一致最终有界(SGUUB). 通过调节设计参数使得追踪误差可收敛到零点的任意小邻域内.

应用Lyapunov直接法进行证明, 选取Lyapunov候选函数

$$\begin{aligned}V = {}&\frac{1}{2}\psi_{\rm e}^2 + \frac{1}{2}m_{\rm u}u_{\rm e}^2 + \frac{1}{2}m_{\rm r}r_{\rm e}^2 +\\ &\frac{1}{2}q_{\rm r}^2 + \frac{1}{2}\frac{g_{\rm u}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm u}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}^2 + \frac{1}{2}\frac{g_{\rm r}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm r}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}^2.\end{aligned} \tag{22}$$

利用式(19)对V求导得

$$\begin{aligned}\dot{V} = {}&\psi_{\rm e}\dot{\psi}_{\rm e} + m_{\rm u}u_{\rm e}\dot{u}_{\rm e} + m_{\rm r}r_{\rm e}\dot{r}_{\rm e} +\\ &q_{\rm r}\dot{q}_{\rm r} + \frac{g_{\rm u}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm u}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}\dot{\hat{\lambda}}_{g_{\rm u}} + \frac{g_{\rm r}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm r}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}\dot{\hat{\lambda}}_{g_{\rm r}} =\\ &\psi_{\rm e}(-k_{\psi_{\rm e}}\psi_{\rm e} - r_{\rm e}\cos\phi) + u_{\rm e}[m_{\rm u}\dot{u}_{\rm d} - \upsilon_{\rm u} -\\ &g_{\rm u}(\cdot)u_{\delta_{\rm s}}(\cdot)] + r_{\rm e}[m_{\rm r}\dot{\beta}_{\rm r} - \upsilon_{\rm r} - g_{\rm r}(\cdot)u_{\delta_{\rm r}}(\cdot)] +\\ &q_{\rm r}\dot{q}_{\rm r} + \frac{g_{\rm u}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm u}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}\dot{\hat{\lambda}}_{g_{\rm u}} + \frac{g_{\rm r}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm r}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}\dot{\hat{\lambda}}_{g_{\rm r}}.\end{aligned} \tag{23}$$

根据杨氏不等式和鲁棒神经阻尼技术, 式(24)(26)–(28)在进一步的稳定性证明中具有重要作用, 其中: $i = u, r$,

$$\begin{aligned}&\nu_i i_{\rm e} - b_i\boldsymbol{S}(i)w_i i_{\rm e} \leqslant\\ &\frac{k_{in}}{4}\varphi_i^2 i_{\rm e}^2 + \frac{\theta_i^2}{k_{in}} + \boldsymbol{S}(i)^{\rm T}\boldsymbol{S}(i)i_{\rm e}^2 + \frac{b_i^2 w_i^{\rm T}w_i}{k_{in}} =\\ &k_{in}\varPsi_i(\cdot)i_{\rm e}^2 + \frac{\theta_i^2}{k_{in}} + \frac{b_i^2 w_i^{\rm T}w_i}{k_{in}},\end{aligned} \tag{24}$$

式中$w_i^{\rm T}w_i$可根据鲁棒神经阻尼技术, 进一步得到

$$\begin{aligned}&\omega_i^{\rm T}\omega_i = \|\boldsymbol{A}_i^{\rm m}i_{\rm e}\|_{\rm F}^2 =\\ &\frac{\omega_{i1}^{\rm T}\omega_{i1} + \cdots + \omega_{in}^{\rm T}\omega_{in}}{\|\boldsymbol{A}_i\|_{\rm F}^2}i_{\rm e}^{\rm T}i_{\rm e} = i_{\rm e}^2,\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{cases}m_{\rm u}\dot{u}_{\rm d}u_{\rm e} - \dot{u}_{\rm d}u_{\rm e} \leqslant\\ (m_{\rm u}+1)\dot{u}_{\rm d}u_{\rm e} \leqslant \dfrac{m_{\rm u}+1}{4}\dot{u}_{\rm d}^2 + (m_{\rm u}+1)u_{\rm e}^2,\\ m_{\rm r}\dot{\beta}_{\rm r}r_{\rm e} - \dot{\beta}_{\rm r}r_{\rm e} \leqslant\\ (m_{\rm r}+1)|\dfrac{q_{\rm r}}{\tau_{\rm r}}r_{\rm e}| \leqslant \dfrac{m_{\rm r}+1}{4}q_{\rm r}^2 + \dfrac{m_{\rm r}+1}{\tau_{\rm r}}r_{\rm e}^2,\end{cases} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}&-\tilde{\lambda}_{g_i}(\hat{\lambda}_{g_i} - \hat{\lambda}_{g_i}(0)) =\\ &-\tilde{\lambda}_{g_i}(\tilde{\lambda}_{g_i} + \lambda_{g_i} - \hat{\lambda}_{g_i}(0)) =\\ &-\tilde{\lambda}_{g_i}^2 + \tilde{\lambda}_{g_i}(\lambda_{g_i} - \hat{\lambda}_{g_i}(0)) \leqslant\\ &-\frac{1}{2}\tilde{\lambda}_{g_i}^2 + \frac{1}{2}(\lambda_{g_i} - \hat{\lambda}_{g_i}(0))^2,\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}q_{\rm r}\dot{q}_{\rm r} = {}&-\frac{q_{\rm r}^2}{\tau_{\rm r}} - q_{\rm r}\dot{\alpha}_{\rm r} = -\frac{q_{\rm r}^2}{\tau_{\rm r}} - q_{\rm r}B_{\rm r}(\cdot) \leqslant\\ &-\frac{q_{\rm r}^2}{\tau_{\rm r}} + \frac{q_{\rm r}^2B_{\rm r}^2M_{\rm r}^2}{2aM_{\rm r}^2} + \frac{a}{2} \leqslant\\ &-(\frac{1}{\tau_{\rm r}} - \frac{M_i^2}{2a})q_{\rm r}^2 - (1 - \frac{B_{\rm r}^2}{M_{\rm r}^2})\frac{M_{\rm r}^2q_{\rm r}^2}{2a} + \frac{a}{2} \leqslant\\ &-(\frac{1}{\tau_{\rm r}} - \frac{M_{\rm r}^2}{2a})q_{\rm r}^2 + \frac{a}{2}.\end{aligned} \tag{28}$$

将实际控制律(20)、自适应律(21)和式(24)–(28)代入式(23), 则$\dot{V}$可被简化为

$$\begin{aligned}&\dot{V} \leqslant\\ &-k_{\rm r}\psi_{\rm e}^2 - (k_{\rm ue} - (m_{\rm u}+1) - \frac{b_{\rm u}}{k_{\rm un}})u_{\rm e}^2 -\\ &(k_{\rm re} - \frac{m_{\rm r}+1}{\tau_{\rm r}} - \frac{b_{\rm r}}{k_{\rm rn}})r_{\rm e}^2 - \sigma_{\rm u}\varGamma_{g_{\rm u}}\frac{g_{\rm u}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm u}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}^2 -\\ &(\frac{1}{\tau_{\rm r}} - \frac{M_{\rm r}^2}{2a} - \frac{m_{\rm r}+1}{4})q_{\rm r}^2 - \sigma_{\rm r}\varGamma_{g_{\rm r}}\frac{g_{\rm r}(\cdot)}{\varGamma_{g_{\rm r}}}\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}^2 +\\ &\frac{\theta_{\rm u}^2}{k_{\rm un}} + \frac{\theta_{\rm r}^2}{k_{\rm rn}} + \frac{a}{2} + \frac{m_{\rm u}+1}{4}\dot{u}_{\rm d}^2 - \sigma_{\rm u}g_{\rm u}(\cdot)\tilde{\lambda}_{g_{\rm u}}\cdot\\ &(\lambda_{g_{\rm u}} - \hat{\lambda}_{g_{\rm u}}(0)) - \sigma_{\rm r}g_{\rm r}(\cdot)\tilde{\lambda}_{g_{\rm r}}(\lambda_{g_{\rm r}} - \hat{\lambda}_{g_{\rm r}}(0)).\end{aligned} \tag{29}$$

定义

$$\varrho=\frac{\theta_{\mathrm{u}}^{2}}{k_{\mathrm{un}}}+\frac{\theta_{\mathrm{r}}^{2}}{k_{\mathrm{rn}}}+\frac{a}{2}+\frac{m_{\mathrm{u}}+1}{4}\dot{u}_{\mathrm{d}}^{2}-\sigma_{\mathrm{u}}g_{\mathrm{u}}(\cdot)\tilde{\lambda}_{g_{\mathrm{u}}}(\lambda_{g_{\mathrm{u}}}-\hat{\lambda}_{g_{\mathrm{u}}}(0))-\sigma_{\mathrm{r}}g_{\mathrm{r}}(\cdot)\tilde{\lambda}_{g_{\mathrm{r}}}(\lambda_{g_{\mathrm{r}}}-\hat{\lambda}_{g_{\mathrm{r}}}(0)), \tag{30}$$

所以进一步将式(29)写为

$$\dot{V}\leqslant-2\kappa V+\varrho, \tag{31}$$

其中:

$$\kappa=\min\{k_{\mathrm{r}},(k_{\mathrm{ue}}-(m_{\mathrm{u}}+1)-\frac{b_{\mathrm{u}}}{k_{\mathrm{un}}}),\sigma_{\mathrm{u}}g_{\mathrm{u}}(\cdot),\sigma_{\mathrm{r}}g_{\mathrm{r}}(\cdot),(k_{\mathrm{re}}-\frac{m_{\mathrm{r}}+1}{\tau_{\mathrm{r}}}-\frac{b_{\mathrm{r}}}{k_{\mathrm{rn}}}),(\frac{1}{\tau_{\mathrm{r}}}-\frac{M_{\mathrm{r}}^{2}}{2a}-\frac{m_{\mathrm{r}}+1}{4})\}.$$

由于$\theta_i(i=u,r)$为鲁棒神经阻尼项中有界参数, 在船舶控制工程领域, 参考信号u_{d}通常存在一阶导数且有上界, 而且执行器提供的能量存在一定上限, 所以执行器增益$g_i(\cdot)(i=u,r)$存在上界$\bar{g}_i(\cdot)$, 因此ϱ有界. 通过对式(31)进行积分, 可以得到

$$V(t)\leqslant\varrho/2\kappa+(V(0)-\varrho/2\kappa)\exp(-2\kappa t).$$

根据闭环增益成形算法[22], $V(t)$满足$\lim\limits_{t\to\infty}V(t)=\varrho/2\kappa$. 因此, 闭环控制系统的所有误差信号满足半全局一致最终有界收敛, 并且调整设计参数可以使误差信号收敛到零的任意邻域内.

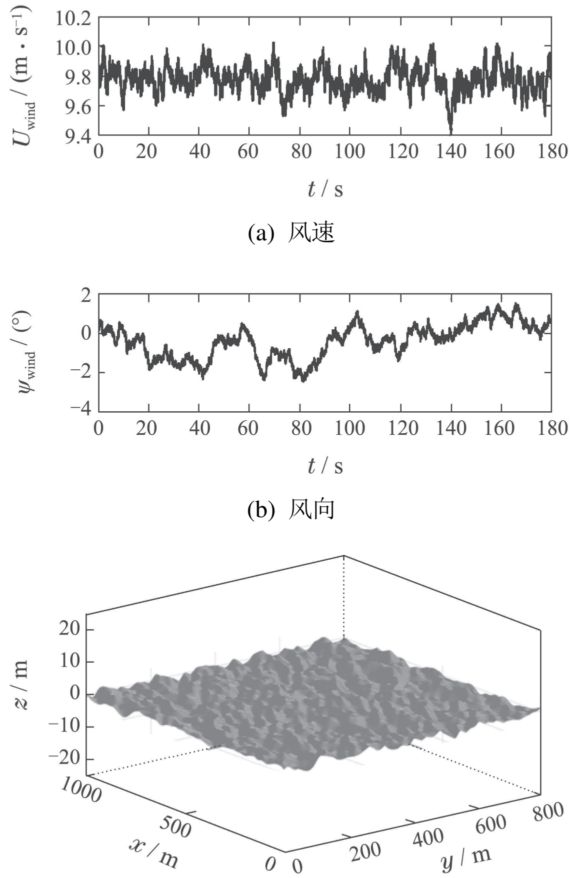
5 计算机仿真

为验证基于速度调节的鲁棒自适应控制器的有效性, 本节基于MATLAB仿真平台, 在模拟海洋环境下与文献[12]中的控制算法进行计算机仿真. 计算机仿真对象为一艘无人帆船机器人, 船长12 m, 船宽3.21 m, 主帆面积170 m^2, 舵面积1.17 m^2, 其他模型参数详见文献[7].

无人帆船机器人系统的初始值为$[\phi(0)\ \ \psi(0)\ \ u(0)\ \ v(0)\ \ p(0)\ \ r(0)\ \ \delta_{\mathrm{s}}(0)\ \ \delta_{\mathrm{r}}(0)]=[0^\circ\ \ 0^\circ\ \ 1\,\mathrm{m/s}\ \ 0\,\mathrm{m/s}\ \ 0^\circ/\mathrm{s}\ \ 0^\circ/\mathrm{s}\ \ 0^\circ\ \ 0^\circ]$, 相关鲁棒自适应控制器设计参数如下:

$$\begin{cases}k_r=0.3,\ k_{\mathrm{re}}=0.4,\ k_{\mathrm{ue}}=0.2,\ \varGamma_{g_{\mathrm{u}}}=0.15,\\ \sigma_{\mathrm{u}}=0.35,\ \sigma_{\mathrm{r}}=0.5,\ \tau_{\mathrm{r}}=0.01,\ \varGamma_{g_{\mathrm{r}}}=0.15,\\ k_{\mathrm{un}}=0.6,\ k_{\mathrm{rn}}=0.5,\ \epsilon_1=1.191,\ \epsilon_2=3.678,\\ a_1=2.097,\ b_1=0.116,\ a_2=-0.746,\\ b_2=-1.759,\ a_3=-1.744,\ b_3=1.752.\end{cases} \tag{32}$$

对于外界海洋环境干扰, 使用文献[23]中的方法建立物理数学模型, 即由挪威石油工业组织规范(norsk sokkels konkurranseposisjon, NORSOK)谱构建风速风向模型和基于联合北海波浪计划(joint north sea wave project, JONSWAP)谱构建的波浪模型. 时变风速和风向干扰如图3(a)–(b)所示, 其中主风向为0°, 主风速为9.8 m/s, 三维海面波浪如图3(c)所示.



(a) 风速

(b) 风向

(c) 三维波浪图

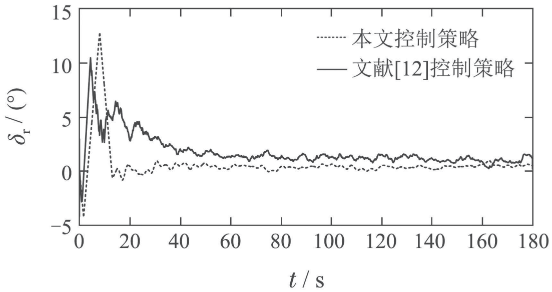
图 3 海洋环境干扰

Fig. 3 Marine environment disturbance

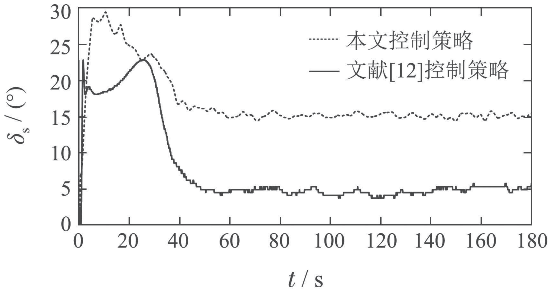
对于无人帆船来说, 当风舷角χ_{w}处于航行死区时, 即无人帆船迎风航行($-22.5^\circ\leqslant\chi_{\mathrm{w}}\leqslant22.5^\circ$)或顺风航行($-180^\circ\leqslant\chi_{\mathrm{w}}\leqslant-165^\circ,\ 165^\circ\leqslant\chi_{\mathrm{w}}\leqslant180^\circ$)时无法执行航向保持任务[24]. 因此, 在进行无人帆船航向保持控制任务时应避开航行死区.

图4–6描述了闭环控制系统在本文算法与文献[12]中算法的主要对比结果. 图4表示输出变量ψ,ϕ,u的历时曲线, 从图4(a)中可以看出, 相对于传统算法, 本文提出的控制算法能够无超调收敛到期望航向, 并且在达到稳定状态时航向抖动较小. 结合图5(a)舵角历时曲线可知, 在达到稳定状态后, 在鲁棒自适应控制的控制下, 舵角几乎收敛到零, 舵机耗能较小. 图4(b)–(c)描述无人帆船系统的横倾和速度响应曲线, 结合图5(b)帆角曲线得知, 在本文控制算法的控制下, 无人帆船系统能够通过调节帆角, 使航行速度收敛到期望速度, 并且由于调节速度的优势, 使得控制系统的横倾较小, 在一定程度上保证了航行系统的安全. 值得注意的是, 帆机的能量消耗受帆角、风向和航向多

种因素影响. 尽管本文控制算法的帆角较大, 但是在北风(风向0°), 参考航向为60°的情况下, 帆角越小, 风帆产生的推力越大, 航行速度越高, 并且文献[12]控制算法产生的最大航行速度高于期望航行速度, 因此为了将航行速度稳定在期望航速, 本文算法产生的帆角较大, 但是风帆产生的推力较小, 进一步帆机能量消耗较小. 图6描述了伺服机构增益自适应参数的变化规律.



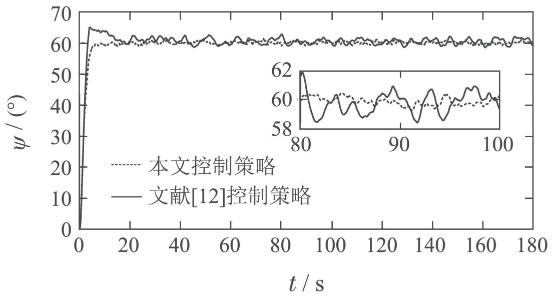
(a) 舵角δ_{r}



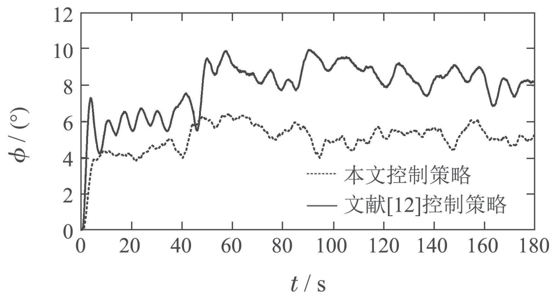
(b) 帆角δ_{s}

图 4 控制输入对比效果

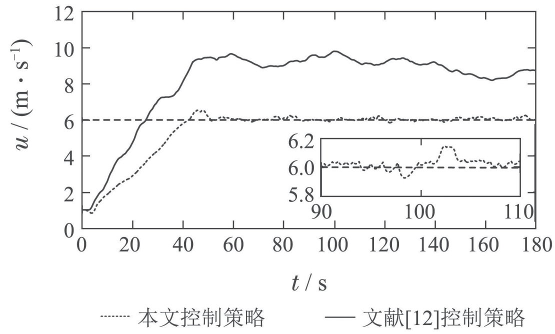
Fig. 4 Comparison of control input efforts



(a) 航向角ψ



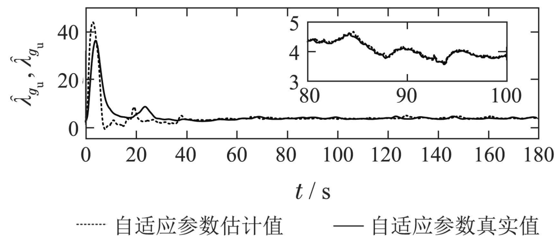
(b) 横倾角ϕ



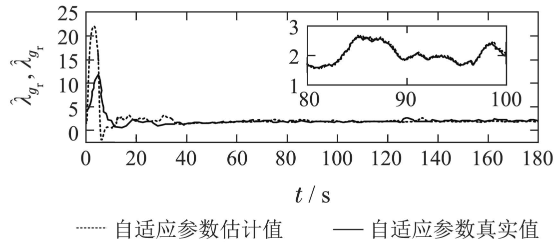
(c) 前进速度u

图 5 船舶姿态变量对比效果

Fig. 5 Comparison effect of vessel attitude variables



(a) $\lambda_{g_{\mathrm{u}}}, \hat{\lambda}_{g_{\mathrm{u}}}$



(b) $\lambda_{g_{\mathrm{r}}}, \hat{\lambda}_{g_{\mathrm{r}}}$

图 6 自适应参数曲线

Fig. 6 Adaptive adjusting parameter curve

为了进一步量化本文与文献[12]控制算法的控制效果, 引入4个性能指标函数, 即平均绝对航向误差(mean absolute course error, MAC)、平均绝对横倾误差(mean absolute roll error, MAR)、平均绝对速度性能(mean absolute speed performance, MAS)和平均绝对输入性能(mean absolute control input, MAI). MAC描述无人帆船机器人航向稳定性能; MAR描述输出变量ϕ的大小, ϕ越小, 无人帆船航行安全性越高; MAS描述系统稳定后(40～180 s)航行速度稳定性能, 在本文算法中, 取$u_m = u_{\mathrm{d}} = 6.0$ m/s, 在文献[12]中取$u_m = 9.0$ m/s; MAI表示闭环控制系统在40 s～180 s期间致动器能量消耗性能. 数值量化对比结果总结如表1所示, 从表中可以得知, 与传统控制算法相比, 无人帆船航行速度能够收敛到期望航速的一个较小的界域内, 尽管控制系统稳定后帆角较大, 但是在本文环境下, 较大的帆角产生较小的推力, 从而达到速度调节的目的, 进一步使得横倾姿态角变小, 在一定程度上保证了闭环控制系统的稳定性.

$$
\begin{cases}
\mathrm{MAC} = \dfrac{1}{t_{\mathrm{end}} - 0} \displaystyle\int_0^{t_{\mathrm{end}}} |\psi_{\mathrm{e}}| \mathrm{d}t, \\
\mathrm{MAR} = \dfrac{1}{t_{\mathrm{end}} - 0} \displaystyle\int_0^{t_{\mathrm{end}}} |\phi(t)| \mathrm{d}t, \\
\mathrm{MAS} = \dfrac{1}{t_{\mathrm{end}} - 40} \displaystyle\int_{40}^{t_{\mathrm{end}}} |u(t) - u_m| \mathrm{d}t, \\
\mathrm{MAI} = \dfrac{1}{t_{\mathrm{end}} - 40} \displaystyle\int_{40}^{t_{\mathrm{end}}} |\delta_i(t)| \mathrm{d}t.
\end{cases} \tag{33}
$$

表 1 本文算法与文献[12]量化对比效果

Table 1 Quantitative comparison of performances for the proposed scheme and the one in [12]

指标	对象/单位	本文算法	文献[12]算法
MAC	$\psi_{\mathrm{e}}/(^\circ)$	0.534	1.473
MAR	$\phi/(^\circ)$	5.369	8.546
MAS	$u/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	0.143	0.692
MAI	$\delta_r/(^\circ)$	0.562	1.238
	$\delta_s/(^\circ)$	15.463	5.628

6 结论

本文针对无人帆船航向保持控制问题, 设计了一种具有速度调节机制的鲁棒自适应航向保持控制算法. 该算法中, 利用动态面技术和鲁棒神经阻尼技术处理“计算爆炸”和模型不确定问题, 并且无人帆船能够实现以期望的航行速度保持在目标航向上自动航行. 鲁棒自适应控制器在保证闭环控制系统鲁棒性和有效性的同时, 易于应用于海洋工程实际. 而且通过Lyapunov稳定性判据, 证明了闭环控制系统误差变量满足半全局一致最终有界稳定. 最后, 在MATLAB仿真平台上验证了所设计控制算法的合理性.

参考文献:

[1] ALVES J C, CRUZ N A. A mission programming system for an autonomous sailboat. *Oceans Conference*. St Johns: IEEE, 2007: 130 – 136.

[2] ARREDONDO-GALEANA A, VIOLA I M. The leading-edge vortex of yachts sails. *Ocean Engineering*, 2018, 159(8): 552 – 562.

[3] YEH E C, BIN J C. Fuzzy control for self-steering of a sailboat. *International Conference on Intelligent Control and Instrumentation*. Singapore: IEEE, 1992: 1339 – 1344.

[4] ABRIL J, SALOM J, CALVO O. Fuzzy control of a sailboat. *Internation Journal of Approximate Reasoning*, 1997, 16(4): 359 – 375.

[5] XIAO L, JOURFFROY J. Modeling and nonlinear heading control for sailing yachts. *MTS/IEEE Oceans Conference*. Waikoloa: IEEE, 2011: 1321 – 1327.

[6] WILLE K L, HASSANI V, SPRENGER F. Modeling and course control of sailboats. *The 10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*. Trondheim: Science Direct, 2016: 532 – 539.

[7] XIAO L, JOURFFROY J. Modeling and nonlinear heading control of sailing yachts. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(2): 256 – 268.

[8] PETRES C, RMERO-RAMIREZ M A, PLUMET F. A potential field approach for reactive navigation of autonomous sailboats. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 6(5): 1520 – 1527.

[9] WANG Qian, XU Jinsong, XU Jianyun. Research on track following control of autonomous sailboat. *Ship Engineering*, 2015, 37(9): 63 – 67.
(王倩, 许劲松, 徐建云. 无人帆船循迹航行的控制研究. 船舶工程, 2015, 37(9): 63 – 67.)

[10] DENG Y J, ZHANG X K, ZHANG G Q. Fuzzy logic based speed optimization and path following control for sail assisted ships. *Ocean Engineering*, 2019, 171(8): 300 – 310.

[11] XIAO L, ALVES J C, CRUE N A, et al. Online speed optimization for sailing yachts using extremum seeking. *MTS/IEEE Oceans Conference*. Hampton Roads: IEEE, 2012: 533 – 538.

[12] CORNO M, FORMENTIN S, SAVARESI S M. Data-driven online speed optimization in autonomous sailboats. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 17(3): 1 – 10.

[13] ZHANG G Q, ZHANG X K, ZHENG Y F. Adaptive neural path-following control for underactuated ships in fields of marine practice. *Ocean Engineering*, 2015, 104(8): 558 – 567.

[14] ZHANG G Q, DENG Y J, ZHANG W D. Robust neural path following control for underactuated ships with dvs obstacles avoidance guidance. *Ocean Engineering*, 2017, 143(10): 198 – 208.

[15] LI Y M, TONG S. Adaptive neural networks prescribed performance control design for switched interconnected uncertain nonlinear systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 29(7): 3059 – 3068.

[16] GE S S, HANG C C, LEE T H, et al. *Stable Adaptive Neural Network Control*. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001: 159 – 170.

[17] WANG H, WANG D, PENG Z H, et al. Adaptive dynamic surface control for cooperative path following of underactuated marine surface vehicles via fast learning. *IET Control Theory and Applications*, 2013, 7(15): 1888 – 1898.

[18] ZHENG Z W, ZOU Y. Adaptive integral LOS path following for an unmanned airship with uncertainties based on robust RBFNN backstepping. *ISA Transactions*, 2016, 65(11): 210 – 219.

[19] ZHAO Q C, LIN Y. Adaptive fuzzy dynamic surface control with prespecified tracking performance for a class of nonlinear systems. *Asian Journal of Control*, 2011, 13(6): 1082 – 1091.

[20] ZHAO Q C, LIN Y. Adaptive dynamic surface control for pure-feedback systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012, 22(14): 1647 – 1660.

[21] PENG Xiuyan, HU Zhonghui. Adaptive nonlinear output feedback control with wave filter for ship course. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(7): 863 – 868.
(彭秀艳, 胡忠辉. 带有海浪滤波器的船舶航向反步自适应输出反馈控制. 控制理论与应用, 2013, 30(7): 863 – 868.)

[22] ZHANG G Q, ZHANG X K. Concise robust adaptive path-following control of underactuated ships using dsc and mlp. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(4): 685 – 694.

[23] FOSSEN T I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. New York: Wiley, 2011: 186 – 193.

[24] PLUMET F, PETRES C, ROMERO-RAMIREZ M A, et al. Toward an autonomous sailing boat. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(2): 397 – 407.

作者简介:

张国庆 博士, 副教授, 目前研究方向为船舶运动控制、鲁棒控制, E-mail: zgq_dlmu@163.com;

李纪强 博士研究生, 目前研究方向为无人帆船自适应控制, E-mail: lijiqiang2018@163.com;

王文新 硕士, 副教授, 目前研究方向为船舶运动控制, E-mail: wangwenxin@dlmu.edu.cn;

张卫东 博士, 教授, 目前研究方向为过程控制、鲁棒控制及在海洋航行器中的应用, E-mail: wdzhang@sjtu.edu.cn.